

**ДИНАМІКА МІЖФАЗОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ
МІЖ КОМПОНЕНТАМИ ПРИ ПЕРЕМІШУВАННІ**

Стадник І. Я.¹, д.т.н., професор, професор кафедри
<https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>

Паньків Ю. Ю.¹, аспірант,
<https://orcid.org/0000-0001-8572-8962>

Василів В. П.², к.т.н., доцент, доцент кафедри,
<https://orcid.org/0000-0002-2109-0522>

Кос Т. С.³, к.т.н., с.н.с.
<https://orcid.org/0000-0002-1158-0763>

¹Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

³Інститут продовольчих ресурсів НААН України, м. Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2020-15-19>

Процеси перемішування, збивання і піноутворення за своєю суттю однакові, та полягають у диспергуванні газу в рідині. Під час змішування та збивання суміші компонентів внаслідок механічної дії набухли, збільшені в об'ємі водонерозчинні білкові речовини (клейковинні білки) утворюють тривимірну губчасто-сітчасту неперервну структуру. Її називають клейковинним каркасом. Саме він визначає еластичні та пружні властивості середовища. Тому метою роботи було встановлення взаємозв'язку газоутримувальної здатності середовища та енергії, затраченої на гідратацію компонентів. Дослідженнями виконувалася задача визначення газоутримувальної здатності середовища зі змінними параметрами висоти рідинної фази від інтенсивності змішування, часу перебігу перехідних процесів формування повного об'єму газорідинного середовища, часу перехідного процесу виходу диспергованої газової фази. Різниця рівнів до утворення газової фази і в режимі перемішування (аерації) визначає значення газоутримувальної здатності. У зв'язку з цим прийшли до висновку про доцільність повної дестабілізації усталених режимів за рахунок зміни режимів дії робочого органа в системі потоків. Додатковим впливом на систему є зміна гідродинамічних режимів у зв'язку з несталою динамікою утворення диспергованої газової фази. Генерування диспергованої газової фази означає присутність енергетичних витрат на утворення міжфазної поверхні, що повинно враховуватися в загальному енергетичному балансі. Одночасно з цим слід назвати ще одну особливість. Частина газової фази, що існувала і продовжує існувати в новому режимі після змішування, потрапляє в режим перехідного процесу. Тому найефективніше замішування відбувається при дотримуванні зміщеного режиму дозування компонентів у зваженому стані та механічного впливу робочого органу. Виходячи з поставлених завдань і умов проведення змішування опари, визначені вимоги до конструкції змішувача, при цьому встановлено, що подача компонентів повинна тривати не менше 45 с. За даний період відбувається гідратація та зменшення споживання енергоресурсів.

Ключові слова: перемішування, тверда, рідка газоподібна фаза, зміна концентрацій, термодинаміка, гідратація, опара

DYNAMICS OF INTER-PHASE INTERACTION
OF COMPONENTS DURING MIXING

*Ihor Stadnyk*¹, PhD, Professor, Professor of Department,
<https://orcid.org/0000-0001-8572-8962>

*Yuliia Pankiv*¹, postgraduate,
<https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>

*Volodymyr Vasylyv*², PhD, Ass. Prof., Ass. Prof. of Department,
<https://orcid.org/0000-0002-2109-0522>

*Tetiana Kos*³, PhD, Sen. Res.,
<https://orcid.org/0000-0002-1158-0763>

¹Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Institute of Food Resources of NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<https://doi.org/10.31073/foodresources2020-15-19>

The mixing, whisking and foaming processes are essentially the same and consist of gas dispersion in the liquid. When mixed and whisked by the mechanical components of a swollen mechanical action, the bulk of water-insoluble proteins (gluten proteins) form a three-dimensional spongy-mesh continuous structure. It is called gluten-free framework. It determines the elastic and elastic properties of the environment. Therefore, the purpose of the work was to establish the relationship between the gas-holding capacity of the medium and the energy spent on hydration of the components. The researches performed the task of determining the gas-holding capacity of the medium with variable parameters of the height of the liquid phase from the intensity of mixing, the time of the transient processes of formation of the full volume of the gas-liquid medium, the time of the transient exit process of the dispersed gas phase. The difference between the levels before the formation of the gas phase and in the mode of mixing (aeration) determines the value of the gas holding capacity. In this regard, they concluded that it is advisable to completely destabilize the established modes by changing the modes of action of the working body in the flow system. An additional influence on the system is the change of hydrodynamic modes due to the unsteady dynamics of the formation of the dispersed gas phase. Generation of the dispersed gas phase means the presence of energy costs for the formation of the interfacial surface, which must be taken into account in the overall energy balance. At the same time, one more feature should be mentioned. Part of the gas phase that has existed and continues to exist in the new mode after mixing enters the transient mode. Therefore, the most effective mixing occurs when the offset mode of dosing of components in the suspended state and mechanical action of the working body is observed. Based on the tasks and conditions for the mixing of the sourdough, the requirements for the design of the mixer were determined, and it was determined that the filing of the components should last at least 45s. Hydration and reduction of energy consumption occur during this period.

Key words: *mixing, solid, liquid gaseous phase, change of concentrations, thermodynamics, hydration, sediment*

Вступ. Початковими умовами змішувального процесу є дотримання рецептури компонентів. Перемішування та збивання напівфабрикатів для хлібопекарського та кондитерського виробництва має свої визначені стадії [1, 2]. Процеси перемішування, збивання і піноутворення за своєю суттю однакові, вони полягають у диспергуванні газу в рідині. Така система у збитій масі утримує в основному газові бульбашки. Між собою вони розділені тонкою плівкою рідини. Схематично структуру піни можна уявити як упаковку бульбашок газу із тонкими плівками основного високодисперсного наповнювача.

До числа біополімерів, які беруть участь в утворенні таких систем, відносяться

білки, крохмаль, пентозани, а також оболонкові частини. У процесі перемішування компонентів емульсії (опари) відбуваються складні колоїдні, фізико-хімічні та біохімічні перетворення під дією води і ферментних систем. Найактивніше протікають колоїдні процеси. В результаті поглинання води білки, крохмаль та пентозани збільшуються в об'ємі, а цукри, мінеральні та водорозчинні речовини й вітаміни переходять у розчин. В утворенні пшеничної опари першорядна роль належить білкам, які поглинають подвійну кількість води в порівнянні зі своєю масою. Осмотично зв'язана волога в них складає 75 %, і абсорбційно зв'язана – 25 %. Саме за рахунок осмотично зв'язаної вологи білкова молекула розпушується та збільшується в об'ємі.

Під час змішування та збивання суміші компонентів внаслідок механічної дії набухлі, збільшені в об'ємі водонерозчинні білкові речовини (клейковинні білки) утворюють тривимірну губчасто-сітчасту неперервну структуру [3]. Її називають клейковинним каркасом. Саме він визначає еластичні та пружні властивості середовища. До складу каркасу входять зерна крохмалю, нерозчинні пентозани, частинки оболонок зерна. Процеси гідратації компонентів середовища відбуваються з різною швидкістю і залежать від температури води. Максимальне набухання білків відбувається за температури 30 °С з водопоглинанням 2,0...2,5 г/г. При вищій температурі набухання білків обмежується. Водопоглинання крохмалю становить 0,3...0,4 г/г води на суху речовину. Пентозани поглинають воду осмотично і утворюють в'язкі розчини, наслідком чого є значне підвищення вологопоглинальної здатності і зміцнення консистенції.

Вважається, що поглинута і зв'язана вода між компонентами розподіляється так, у %: цілі зерна крохмалю – 26,4; ушкоджені зерна крохмалю – 19,1; білки клейковини – 31,2; пентозани – 23,4 [4].

Стосовно утвореного змішуванням борошна з водою розрізняють три фази: тверду, рідку та газоподібну. *Тверда фаза* створюється нерозчинними білками, що утворюють клейковинний каркас і забезпечують його розтягуваність та еластичність. *Рідка фаза* є в'язким розчином, який складається зі зв'язаної адсорбційно складовими борошна і води. *Газоподібна фаза* утворюється внаслідок насичення тіста кульками повітря під час змішування та частково внесенням повітря борошном, водою, яйцями, молочним білком, казеїнатом натрію та ін. Вважається, що в загальному об'ємі середовища газова фаза близька до 10 % [4].

Аналіз досліджень. Значна кількість речовин в середовищі, зміна концентрацій, взаємодії між ними і мікроорганізмами, присутність стимуляторів тощо, призводять до відносної нестабільності системи. За таких умов існують напрямки при яких оцінюються впливи окремих факторів. Проте негативні наслідки також слід програмувати, наприклад, за величинами осмотичних тисків, впливів факторів, погіршення якісних показників продукції тощо. Якщо вплив температури можна прослідкувати, то відносно фізичного тиску остаточної точки зору не існує [5]. Проте положення термодинаміки тісно пов'язують параметри тиску і температури, наприклад, в газових законах, рівнянні Менделєєва-Клайперона, законі Генрі, тощо. З точки зору технічної доступності у впливах на зброджувані масиви інтерес мають адіабатні або політропні процеси [6, 7]. У зв'язку зі стисканням утворюючої суміші на поверхні камери, частково підвищується температура газової фази. Очевидно, що до стискання системи температури газової фази і опари співпадають. Однак після стискання отримуємо співвідношення температур:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1)$$

в адіабатному процесі і у політропному,

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \quad (2)$$

де T_1 і T_2 – відповідно початкова і кінцева температура газової фази;

P_1 і P_2 – відповідно початковий та кінцевий тиск;

k і m – показники адіабати і політропи.

Енергія, що вводиться в систему за таких умов [6], дорівнює:

$$E = \frac{MR}{k-1}(T_2 - T_1), \quad (3)$$

де M – маса стиснуваного газу;

R – універсальна газова стала.

Введена таким чином енергія має перерозподілятися між диспергованою газовою фазою і опарою, де загальна температура системи зростає.

У відповідності до закону Генрі зростання парціального (а у нашому випадку загального) тиску підвищує розчинність газу в рідинній фазі середовища, а збільшення температури зменшує розчинність:

$$c_H = kP, \quad (4)$$

де k – константа Генрі.

Цей показник враховує як коефіцієнт пропорційності впливає на температуру та фізико-хімічні властивості складових системи. Збільшення температури зменшує розчинність c_H (рис. 1).

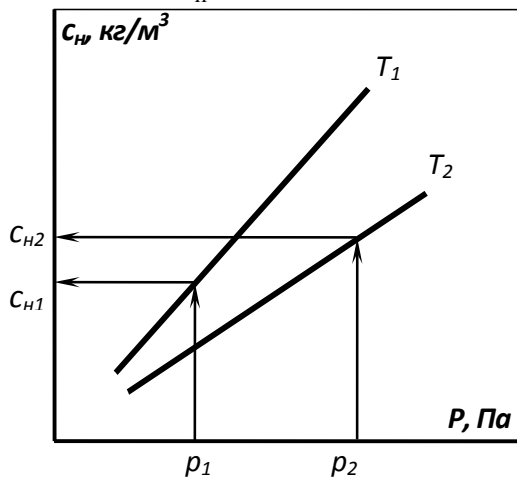


Рис. 1. Графік залежності між параметрами c_H та P у відповідності до закону Генрі

На графіку ізотерми T_1 та T_2 вказують, що теоретично можливими є варіанти, за яких розчинність зростає, знижується або залишається сталою зі змінами тиску. Разом з тим температура середовища у відповідності до закону Вант-Гоффа впливає на осмотичний тиск розчину:

$$\pi = CRT, \quad (5)$$

де π – осмотичний тиск розчину, кПа;

C – мольно-об'ємна його концентрація (молярність), кмоль/л;

$R = 8,314$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала.

Молярність розчину C являє собою відношення кількості розчиненої речовини n до об'єму розчину V (л):

$$C = n/V, \quad (6)$$

а кількість речовини дорівнює її масі m , розділену на мольну масу M . Звідси маємо:

$$C = \frac{m}{MV} \quad (7)$$

та рівняння Вант-Гоффа:

$$\pi V = \frac{mRT}{M}; \quad \pi = \frac{mRT}{MV}. \quad (8)$$

З останньої умови витікає, що окрім впливу температури T середовища, яка може обиратися в достатньо помітному діапазоні, значніший вплив на осмотичний тиск досягається за рахунок деструкції цукрів та інших органічних полімерів в процесі бродіння, збивання, оскільки кінцевими результатами трансформацій є спирт і діоксид вуглецю та повітря.

Таким чином, вторинним наслідком зміни тисків у системі є зміна температур диспергованої газової фази, введення додаткової енергії в систему, зміна осмотичних тисків. Первинним же наслідком зміни тиску в середовищі є активне перемішування суміші компонентів. Його перебіг відбувається в умовах об'ємного напруженого стану за рахунок стискання або розширення газової фази. При цьому важливо, що за таких умов виникає взаємодія між локальними зонами, центрами яких є газові каверни. Виникнення останніх у фізичній суті відповідає явищу розриву суцільності середовища на основі трансформації хімічної енергії з'єднань середовища у механічну потенціальну і одночасно кінетичну енергію зміни форм і розмірів.

Перехідний процес активного газоутворення впливає на зростання габаритних розмірів масиву середовища і його об'єму. Однак швидкість таких змін є достатньо обмеженою. Зміни об'єму середовища відбуваються в потенціальному полі сил тяжіння, подолання яких здійснюється рушійним фактором потенціальної енергії утвореної газової фази при інтенсивному створенні змінних імпульсів діючих сил [7, 8].

Перебіг таких процесів може бути достатньо швидкоплинним. При цьому відбувається поєднання двох процесів, оскільки до імпульсного перемішування додається зброджування цукрів середовища. Наслідком такого поєднання є інтенсифікація масообмінних і біохімічних процесів. Іншими будуть прояви енергетичних імпульсів в умовах різких знижень тиску. Різниця в тисках означає перехід системи до нових параметрів термодинамічної рівноваги з швидкоплинним наростанням газоутримувальної здатності системи через розширення газової фази з відповідним доповненням її кількості. Цей факт відбувається у зв'язку з десорбцією розчиненої частини газової фази. Очевидно, що такий перехідний процес стосується не лише газової фази, а однозначно і рідинної, оскільки збільшення об'єму газової фази однозначно визначає зростання об'єму газорідинної суміші і переміщення рідинної фази. Динаміка останнього супроводжується появою сил інерції і, відповідно, збільшенням тиску в частині загального і програмованого його зниження.

Переміщення рідинної фази в результаті утворення диспергованої газової фази здійснюється по вертикалі робочої камери. Утворена газорідинна система у динаміці з пружними системами твердих тіл з розподіленими масами призводить до висновку про їх еквівалентність і про можливість застосування принципу Релея для визначення приведеної маси рідинної фази. Наявність даних щодо мас досліджуваної системи і силових дій на неї означає можливість використання принципу Лагранжа-Деламбера в її моделюванні. Визначення рушійного фактора пов'язується з динамікою зміни швидкості руху і тисків. Їх реакції на імпульсне енергетичне збурення будуть співпадати, оскільки генераторами механічного впливу за зниження тисків є сама газова фаза.

Мета роботи полягає у встановленні взаємозв'язку газоутримувальної здатності середовища та енергії, затрачуваної на гідратацію компонентів.

Матеріали та методи дослідження. Дослідженнями виконувалася задача визначення газоутримувальної здатності середовища зі змінними параметрами висоти рідинної фази $h_{p.f.}$ від інтенсивності змішування, часу перебігу перехідних процесів формування повного об'єму газорідинного середовища, часу перехідного процесу виходу диспергованої газової фази.

Різниця рівнів до утворення газової фази і в режимі перемішування (аерації) визначає значення газоутримувальної здатності. Початок і завершення перебігу перехідних процесів (одержання однорідної маси) фіксувався візуально. Зміна висоти рідинної фази супроводжувалася аналогічно до циклу змін параметрів впливу.

Виклад основного матеріалу. Зміна Δh висоти набухлого газорідинного шару порівняно з висотою рідинного означала можливість визначення величини газоутримувальної здатності:

$$u_{r.p.c.} = \Delta h f, \quad (9)$$

де f – площа перерізу робочої камери. При внутрішньому діаметрі камери $d = 0,15$ м маємо $f = 0,0177$ м².

Результати вимірів первинних даних наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати визначення гідродинамічних параметрів системи з повітрям

Висота рідинної фази $h_{р.ф.} = 0,2$ м						
Відлік показання ротаметра	0,0	10,0	15,0	18,0	20,0	27,0
Висота суміші, м	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,195
Утримувальна здатність, м ³	0,000708	0,000885	0,001239	0,001416	0,001593	0,001682

Аналіз одержаних даних приводить до очікуваного висновку про зростання газоутримувальної здатності в системі при інтенсивному змішуванні компонентів, що впливає на збільшення газового потоку на аерацію і висоту рідинної фази. Разом з тим фіксується ефект перехідного процесу, за яким стабілізація швидкості газової фази відбувається на висоті 0,15...0,2 м над площиною її введення в рідинну. Графічна інтерпретація результатів табличних даних наведена на рис. 2.

Виконання перехідних процесів в змішувальних системах може відбуватися в режимах різкого збільшення газоутримувальної здатності або її зменшення в планових умовах.

До числа перехідних процесів в умовах введення рідинного руху потоків відносяться ті, яким відповідає поява диспергованої газової фази в повному об'ємі середовища. При цьому на момент утворення і виходу газової фази з середовища рівень газоутримувальної здатності є найбільшим з наступним активним зменшенням та переходом до усталеного режиму. Пояснити такий перебіг процесів можливо утворенням на цей момент циркуляційних контурів в робочій камері і збільшенням за цей рахунок абсолютної швидкості газової фази.

Перехідному процесу також відповідає припинення інтенсивної дії робочого органа на утворення газової фази. Якщо воно здійснюється різким зменшенням потоку, то його результатом є масове спливання диспергованої газової фази.

Помічена різниця швидкостей спливання масивів повітря пояснюється фізичними властивостями газу і взаємодією його диспергованих масивів з рідиною. Очевидно, що на етапах спливання масивів має місце перебудова циркуляційних потоків в залишках газорідинної фази і одночасно всієї системи, яка представлена сукупністю рідинної і газорідинної фаз (рис. 3).

У такій взаємодії відбувається переміщення рідинної фази, зменшується енергетичний потенціал. У зв'язку з швидкоплинністю перебігу такого етапу відмітимо його відносно малий вплив на технологічний процес і відсутність підведення зовнішнього енергетичного потоку, оскільки перебіг подій відбувається за рахунок потенціальної і кінетичної енергії системи на початок етапу.

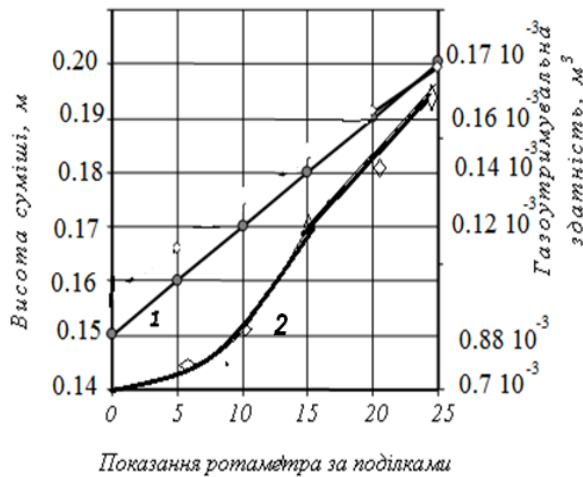


Рис. 2. Залежність висоти суміші "рідина–повітря" (1) та її газоутримувальної здатності (2) від показів ротаметра за висоти рідинного шару 0,2 м

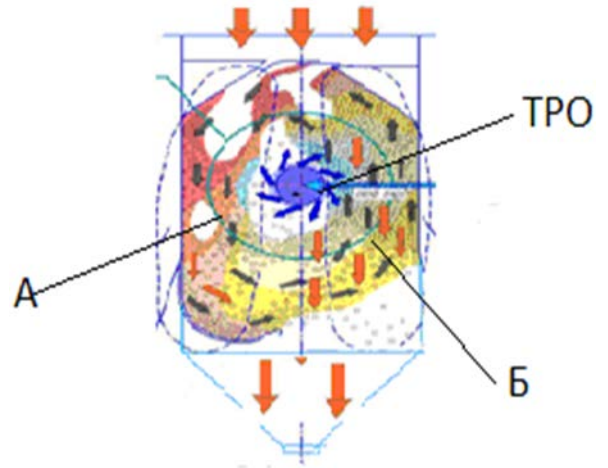


Рис. 3. Схема руху змішуваних компонентів в робочій камері: А – циркуляційний контур руху компонентів; Б – дія сил на компоненти; ТРО – тарільчастий робочий орган

У зв'язку з останнім і частиною дослідів, яка стосувалася визначення газоутримувальної здатності прийшли до висновку про доцільність повної дестабілізації усталених режимів за рахунок зміни режимів дії робочого органа в системі потоків.

При цьому треба врахувати, що складова роботи $A_{гид}$ гідратації раніше не досліджувалась. Її величину приймали у відповідних параметрах. Тому у нашому випадку енергія, затрачена на гідратацію компонентів буде розглядатися системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta U = A_{заг} + q \\ Q_{гид} = \frac{BC_T \Delta t_{гид}}{M} \end{cases} \quad (10)$$

- де ΔU – зміна внутрішньої енергії;
- $Q_{гид}$ – кількість теплоти наданої за рахунок гідратації Дж;
- $\Delta t_{гид}$ – приріст температури за рахунок гідратації;
- q – кількість теплоти наданої системі, Дж;
- $A_{заг}$ – робота проведена системою, Дж;
- M – кількість борошна в опарі, кг;
- B – кількість оброблювальної опари, кг;
- C_T – питома теплоємність опари, кДж/кг.

При збиванні суміші, де відсутня робота на пластифікацію, припускали:

$$A_{заг} = Q_{гид} \quad (11)$$

Враховуючи, що автор процесу змішування [9] вважає що:

$$C_T = \frac{C_M M + W}{B} \quad (12)$$

- де C_M – питома теплоємність борошна, кДж/кг;
- W – кількість води (замінники) по рецептурі опари, кг;
- M – кількість борошна, кг;
- B – кількість оброблювальної опари, кг.

$$\text{Тоді: } \dots\dots\dots \left\{ \begin{array}{l} A_{\text{гід}} = \frac{BC_T \cdot \Delta t_{\text{гід}}}{M} \\ A_{\text{гід}} = \Delta U - g \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\text{Зміна внутрішньої енергії: } \Delta U = \frac{(C_M M + W) \cdot \Delta t_{\text{гід}}}{M} \quad (14)$$

$$\text{Розв'язок (10): } \dots\dots\dots A_{\text{гід}} = \frac{\Delta t}{M} (CM + B) \dots\dots\dots (15)$$

З аналізу вище викладеного щодо енергії, яка може в різних формах передаватися через робочий орган на середовище, взято загальні режими циклу енергетичних змін в зростанні швидкості спливання газового диспергованого масиву, тобто, складову стадійності змішування. Максимальне дроблення бульбашок газу в утворюючій суміші при рівномірному рівні дії поверхні тарільчастого робочого органу, сприяє виникненню тонкостінної дрібної рівномірної пористості виробів. Дроблення бульбашок газу є одним з основних факторів, що впливають на стійкість форми напівфабрикату. В подальшому вона трансформується в інші якісні показники. При цьому слід забезпечити мінімальні витрати енергії на створення однорідної суміші з досить рівномірним розподілом по всьому промішаному об'єму концентрації твердих компонентів (борошна) у рідкій фазі.

Досягнутий рівномірний стан суміші нестійкий. Аерація суміші сприяє збільшенню швидкості обмінних процесів, що в цілому відображається на її насиченні киснем. При цьому насичення суміші киснем призводить до інтенсивного процесу каталізу окислювання. Частина бульбашок має вигляд емульсії газу в рідкій фазі суміші, а інша - в набухлих білках суміші у вигляді газових бульбашок. Збільшення поглинання об'єму води активізує дії ферментів, що в цілому визначає процеси набухання й пептизації білків і розрідження суміші.

З огляду на це, проводили прогнозування зміни об'єму утворюючої системи при змішуванні у вигляді пористості (об'єму газової фази). З рівняння енергетичного балансу знаходили роботу затрачену на нагрівання структурних компонентів й взаємодіючого робочого органа з ними [1]:

$$A_3 = \frac{t_2 - t_1}{\pi \tau} (m_T c_T - m_M c_M) \quad (16)$$

Враховуючи закон Менделєєва-Клайперона для ідеального газу [8] й рівняння теорії [1] та визначеної гідротації, отримали:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \\ A_{\text{заг}} = A_3 + A_{\text{гід}} = \frac{t_2 - t_1}{\pi \tau} (m_T c_T - m_M c_M) + \frac{\Delta t}{M} (C_6 M + B) \end{array} \right. \quad (17)$$

Припустивши, що $T_2 = t_2 - t_1$, проводили перетворення системи рівнянь й визначали об'єм газової фази V_2 .

Додатковим впливом на систему є зміна гідродинамічних режимів у зв'язку з несталою динамікою утворення диспергової газової фази. Поверхня газорідного потоку визначається через сукупність фізико-хімічних властивостей середовища і швидкості обтікання поверхні робочого органа. Утворювані газорідні контури частіше носять хаотичний характер, що також призводить до порушень теплової циркуляції. При цьому рівні таких порушень можуть бути достатньо глибокими зі змінами напрямків в контурах робочої камери.

Таким чином, гідродинамічні режими в робочій камері визначаються трьома

причинами. Перша з них стосується утворених потоків поверхневих контурів при взаємодії у зваженому стані дозуючої дріжджової суспензії та дозуючого борошна. Друга – це утворення потоків поверхневих контурів при обертовій дії тарільчастого робочого органа. Третя причина стосується утворення потоків за участю газової фази та гравітаційної дії на потоки, які стрімко стікають по стінках циліндричної робочої камери.

Очевидно, що кожна з названих причин характеризується своїми рушійними факторами. Для першого і другого факторів є різниця руху середовища і температур. У третьому ж випадку рушійним фактором є присутність диспергованої газової фази і притому значення має швидкість утворення останньої, що, у свою чергу, залежить від швидкості збивання і утворення пінного каркасу. Певного рівня узагальнення в останньому випадку може бути представлено утримувальною здатністю середовища по газовій фазі. Газоутримувальна здатність середовища залежить від зміни висоти рідинної фази $h_{p.ф.}$ в робочій камері машини, інтенсивності аерації, часу перебігу перехідних процесів формування повного об'єму газорідинного середовища, часу перехідного процесу виходу диспергованої газової фази. Характеристики газу наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Фізичні параметри повітря

Газ	Молекулярна маса	Питома маса, кг/м ³	Газова стала, Дж/(кг·К)
Повітря	28,96	1,293	287

Зміна Δh висоти набухлого газорідинного шару порівняно з висотою рідинного означала можливість визначення величини газоутримувальної здатності:

$$u_{г.р.с.} = \Delta h f. \tag{18}$$

де f – площа перерізу робочої камери.

Відповідно об'єм набухлого газорідинного шару для кожної зони робочої камери, буде становити:

$$V = \pi \int_{h_1}^{h_2} y^2 dx \tag{19}$$

де y – радіус циліндричної камери, мм;
 x – висота камери, мм.

Із врахуванням того, що рівень центральної частини опари в середньому на 20...30мм вищий, чим у стінок робочої камери та із врахуванням конічної її частин, то об'єм для утвореної суміші перед вивантаженням буде визначатися:

$$V_{заг} = \pi \int_{h_1}^h [y_1 + (x - h_1)tg\alpha]^2 dx = \frac{\pi}{3tg\alpha} \left\{ [y_1 + (h - h_1)tg\alpha]^3 \right\}. \tag{20}$$

Швидкість генерування газової фази визначена технологією процесу і в кожному поперечному перерізі циліндричної робочої камери машини можливо виявити ознаки диспергованої газової фази. Системою керування термодинамічних параметрів передбачено досягнення максимального тиску $P_1 = P_{max}$, і від моменту його досягнення передбачається зниження до певного значення P_2 . При цьому: $\Delta P = P_1 - P_2$.

Важливо, що зміна тиску ΔP від координати обраної точки в робочій камері не залежить. Об'єм утвореного середовища залежить від величини утримувальної здатності та від розташування відповідних його прошарків. Очевидно, що утворена фаза є у формі масивів диспергованих бульбашок, загальний об'єм яких обчислюється з використання рівняння Менделєєва-Клайперона:

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{\text{O}_2}}{P_{(к)}} RT. \quad (21)$$

Питома маса O_2 є відомою (табл. 2) і відомим є кінцевий тиск $P_{(к)}$, який відповідає обраній координаті h , тоді:

$$P_{(к)} = P_0 + mgh. \quad (22)$$

Тому питомий об'єм утвореної збивальної маси згідно рецептури з відповідним насиченням повітря, буде становити:

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{\text{O}_2}}{P_0 + mgh} RT, \quad (23)$$

де R і T – відповідно універсальна газова фаза і абсолютна температура середовища.

Вказане генерування диспергованої газової фази означає присутність енергетичних витрат на утворення міжфазної поверхні, що повинно враховуватися в загальному енергетичному балансі. Одночасно з цим слід назвати ще одну особливість. Частина газової фази, що існувала і продовжує існувати в новому режимі після змішування, потрапляє в режим перехідного процесу. Існування є неминучим, оскільки на нову зароджену в середовищі бульбашку миттєво діє Архімедова сила незалежно від того, в якому стані знаходиться рідинна фаза. У зв'язку з цим починається відносно переміщення газової фази зі зростаючою швидкістю до значення, за якого сила опору середовища стане рівною Архімедовій силі. Тому з утвореним середовищем необхідно на протязі певного періоду (10...20с.) провести технологічну операцію - вивантаження напівфабрикату.

Висновки. Найбільше змінюється об'єм суміші в кінці стадії змішування при максимальній масі (згідно рецептури), тобто в утвореній суміші та відсотковому складі газової фази 13.6 %. Тому найефективніше змішуються порошкоподібні тверді речовини й рідини на поверхні контакту фаз, при цьому необхідно дотримуватися зміщеного режиму дозування компонентів у зваженому стані та механічного впливу робочого органу. Виходячи з поставлених завдань і умов проведення змішування опари, визначені вимоги до конструкції змішувача, при цьому встановлено, що подача компонентів повинна тривати не менше 45с. За даний період відбувається гідратація та зменшення споживання енергоресурсів.

Бібліографія

1. Стадник І. Я., Лісовенко О. Т. Процеси та машини для замішування тіста Тернопіль: видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 212 с.
2. Стадник І. Я., Лісовенко О. Т. Застосування способів вібраційного та пульсаційного замішування при розробці нової тістомісильної машини. Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. 2009. № 4. С. 37–40.
3. Добротвор І. Г., Стадник І. Я. Дослідження розподілу концентрацій розчинних шарів при змішуванні. Хранение и переработка зерна. 2011. № 8. С. 48–50.
4. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва. К.: Логос, 2002. – 365 с.
5. Стадник І. Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста: автореф. дис....докт. техн. наук: спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв». Стадник Ігор Ярославович; НУХТ. К., 2014. 40 с.
6. Соколенко А. І., Костюк В. С., Васильківський К. В. та ін. Енергетичні трансформації в харчових технологіях. Харчова промисловість. 2012. № 13. С. 198–204.
7. Соколенко А. І., Піддубний В. А., Шевченко О. Ю. та ін. Моделювання гідродинаміки газорідинних середовищ в умовах бродіння. Магарач. Виноградарство и виноделие. 2007. № 1. С. 119–121.

8. Соколенко А. І., Шевченко О. Ю., Піддубний В. А. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових технологіях. К.: Люксар, 2008. 443 с.

9. Янаков В. П. Обґрунтування параметрів і режимів роботи тістомісильної машини періодичної дії: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв». 2011. 20 с.

References

1. Stadnyk I. (2011). Protsesy ta mashyny dlia zamishuvannia tista: Monografiia. [Dough kneading processes and machines: Monograph]. Ternopil: publishing house TNTU them. I. Pulia, 212 p. [in Ukrainian].

2. Stadnyk I., Lisovenko O. (2009). Zastosuvannia sposobiv vibratsiinoho ta pulsatsiinoho zamishuvannia pry rozrobtsi novoi tistomisylnoi mashyny. [Application of vibration and pulsation mixing methods in the development of a new dough mixing machine]. Khlibopekarska i kondyterska promyslovist Ukrainy. [Bakery and confectionery industry of Ukraine]. № 4. p. 37–40.

3. Dobrotvor I., Stadnyk I. (2011). Doslidzhennia rozpodilu kontsentratsii rozchynnykh shariv pry zmishuvanni. [Investigation of the distribution of concentrations of soluble layers during mixing]. Khranenyє y pererabotka zerna. [Storage and processing of grain]. № 8. P. 48–50.

4. Drobot V. (2002). Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva: Monografiia. [Technology of bakery production: Monograph]. Kyiv: Lohos, 365 p. [in Ukrainian].

5. Stadnyk I. (2014). Naukovo-tekhnichni osnovy protsesiv ta rozrobka obladdannia dlia bezlopatovoho zamishuvannia tista: avtoref. dys. ...dokt. tekhn. Nauk. [Scientific and technical basics of processes and development of equipment for dough-free kneading of dough: abstract. diss. ... Doc. tech. Sciences]. Kyiv: NUKhT, 40 p. [in Ukrainian].

6. Sokolenko A., Kostyuk V., Vasylykivsky K. (2012). Enerhetychni transformatsii v kharchovykh tekhnolohiiakh. [Energy Transformations in Food Technologies]. Kharchova promyslovist [Food Industry]. № 13. P. 198–204. [in Ukrainian].

7. Sokolenko A., Piddubnyi V., Shevchenko O. (2007). Modeliuvannia hidrodynmiky hazoridynnykh seredovyshech v umovakh brodinnia. Modeling of hydrodynamics of gas-liquid media under fermentation conditions. Maharach. Vynohradarstvo y vynodelye. Magarach. Viticulture and winemaking. № 1. P. 119–121. [in Ukrainian].

8. Sokolenko A. (2008). Intensyfikatsiia masoobminnykh protsesiv v kharchovykh tekhnolohiiakh. [Intensification of mass-exchange processes in food technologies]. Kyiv: Liuksar, 443 p. [in Ukrainian].

9. Yanakov V. (2011). Obhruntuvannia parametriv i rezhymiv roboty tistomisylnoi mashyny periodychnoi dii: avtoref. dys. kand. tekhn. Nauk. [Justification of parameters and modes of operation of the dough mixing machine of periodic action: author. diss. Cand. tech. Sciences]. Kyiv: 20 p. [in Ukrainian].